

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2014

Bc. Tomáš Chalupka

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Výkonová jednotka pro fotovoltaiiku
Power Unit of Photovoltaic Inverter

2014

Bc. Tomáš Chalupka

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Tomáš Chalupka

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2612T015 Elektronika

Téma:

Výkonová jednotka měniče pro fotovoltaiku
Power Unit of Photovoltaic Inverter

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte popis principů DC/DC měničů vhodných pro připojení k fotovoltaickým panelům.
2. Navrhněte a realizujte výkonovou jednotku DC/DC měniče pro fotovoltaický panel daných parametrů s možností řízení mikropočítačovým systémem.
3. Ověřte funkčnost měniče měřeními nejdůležitějších veličin.

Seznam doporučené odborné literatury:

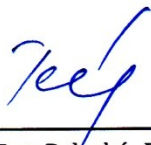
Dle pokynů vedoucího závěrečné práce

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014



doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

PROHLÁŠENÍ

„Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma Výkonová jednotka pro fotovoltaiku vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne 6. 5. 2014



.....
Bc. Tomáš Chalupka

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Petru Palackému, Ph.D. za odbornou pomoc a cenné rady při zpracovávání této práce.

ABSTRAKT

Hlavním cílem této práce je provést teoretický rozbor a popis základních DC/DC měničů vhodných pro připojení k fotovoltaickým panelům. Dále navrhnout a realizovat výkonovou jednotku zvyšujícího DC/DC měniče pro fotovoltaický panel s danými parametry a s možností řízení mikropočítačovým systémem. Následně ověřit funkčnost měření nejdůležitějších veličin.

KLÍČOVÁ SLOVA

DC/DC měnič, zvyšující měnič, snižující měnič, invertující měnič, akumulární měnič, propustný měnič, simulace DC/DC měniče, konstrukce DC/DC měniče, fotovoltaický panel

ABSTRACT

The main objective this thesis is to perform theoretical analysis and description of the basic DC/DC converter suitable for connection to photovoltaic panels. Then design and realize power unit boost DC/DC converter for photovoltaic panel with the specified parameters and the possibility of microcomputer control system. Then verify the functionality of measuring the most important variables.

KEY WORDS

DC / DC inverter, boost converter, buck converter, inverting converter, flyback converter, forward converter, simulation of DC/DC converter, design and construction DC/DC converter, photovoltaic panels

Obsah

ÚVOD	1
1. ROZDĚLENÍ DC/DC MĚNIČŮ	2
1.1. DC/DC měniče bez galvanického rozdělení	2
1.1.1. Snižující měnič (buck) - step down	4
1.1.2. Zvyšující měnič (boost) - step up	6
1.1.3. Invertující měnič	8
1.2. DC/DC měniče s galvanickým oddělením	9
1.2.1. Akumulující měnič	9
1.2.2. Propustný měnič	11
1.3. Shrnutí měničů	13
2. NÁVRH VÝKONOVÉ ČÁSTI DC/DC MĚNIČE	14
2.1. Výpočet parametrů měniče (výpočet tlumivky)	15
2.2. Simulace navrženého měniče	19
2.3. Návrh a dimenzování součástek	22
2.4. Návrh a výpočet chladiče	24
2.5. Pomocné a ochranné obvody měniče	27
2.6. Schéma DC/DC měniče	30
2.7. Seznam součástek	32
3. Měření na DC/DC měniči	33
3.1. Měření měniče buzeného z generátoru signálu	33
3.2. Měření zatěžovací charakteristiky	33
3.3. Fotodokumentace	38
4. Závěr	40
Seznam literatury:	41
Seznam použitých zkratk a symbolů:	42

ÚVOD

Užití elektrické energie v místech, kde ji nelze přivést je nejčastěji řešeno fotovoltaickými panely, které nelze využívat po celou dobu dne. Energie, kterou fotovoltaické panely produkují během dne velmi kolísá. Jsou tedy velmi závislé na silném a přímém osvitu slunečním zářením. Proto abychom mohli sluneční energii využít, je zapotřebí abychom dodanou energii mohli vhodně zpracovat (na příslušnou momentálně potřebnou hladinu napětí) nebo někde uskladnit na dobu, kdy je sluneční aktivita malá, a panel nevyrábí energii. K tomuto účelu se používají nejčastěji DC/DC měniče napětí, které jsou dále popsány.

Můžeme tedy říci, že energii získanou ze slunce jsme schopni převést na energii elektrickou a uchovat v akumulátorech pro další případnou potřebu. Tato práce tedy naznačí jak lze navrhnout zvyšující DC/DC měnič, pro připojení k fotovoltaickému panelu.

1. ROZDĚLENÍ DC/DC MĚNIČŮ

Pojem DC/DC měnič nebo jinak řečeno stejnosměrný měnič nazýváme elektronický měnič, vyživaný ke změně stejnosměrného napětí nebo proudu. Jako spínací prvky se zde využívají nejčastěji tranzistory (MOSFET nebo IGBT) a diody, pro dočasné pojmnutí naakumulované energie se využívají kondenzátory a cívky, pro galvanické oddělení se využívají transformátory.

Základním dělením DC/DC měničů, vhodných pro připojení k fotovoltaickým panelům je možnost galvanického oddělení vstupní části obvodu (fotovoltaického panelu) od výstupní části obvodu (akumulátoru). Z toho plyne, že se jedná o DC/DC měnič s galvanickým oddělením (nejčastěji s transformátorem) a DC/DC měnič bez galvanického oddělení.

1.1. DC/DC měniče bez galvanického rozdělení

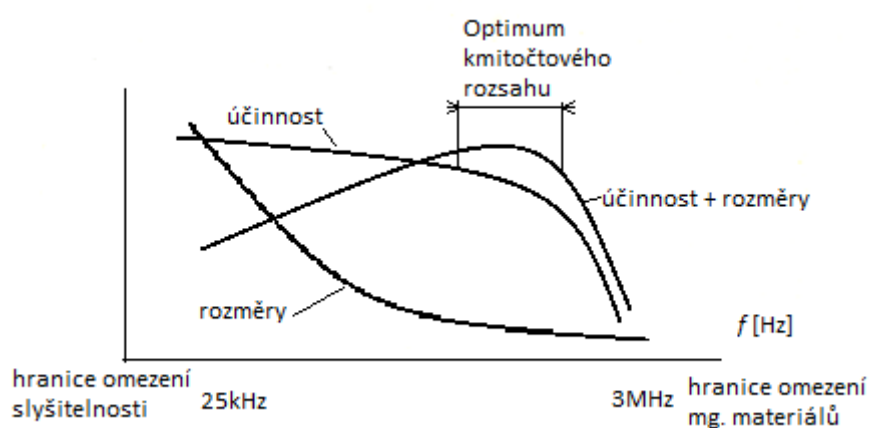
DC/DC měnič je název, jenž nám nic nenapovídá, o jaký typ měniče se jedná. Jednoznačnou definicí bude, požadujeme-li výstupní napětí vyšší než vstupní napětí, a nebo opačně. Budeme-li mít výstupní napětí nižší než napětí vstupní, hovoříme o snižujícím měniči napětí neboli BUCK. V opačném případě, je-li výstupní napětí vyšší než vstupní, jde o zvyšující měnič, nazývaný BOOST.

Omezujícím parametrem s nímž se setkáme při návrhu měniče je spínací kmitočet. Princip měniče spočívá v přenesení energie ze vstupu (FV panel) na výstup (akumulátor), kdy množství energie jenž je přenášena je přímo úměrná spínacímu kmitočtu. Sice nám s rostoucím kmitočtem klesá požadavek na velikost prvků jenž nám akumulují energii (nabíjející se kondenzátory a energie ukládána do magnetického pole cívek), z čehož plyne volby co nejvyššího spínacího kmitočtu, převažují nám nevýhody, jenž plynou z následujících problematik.

Vysoký spínací kmitočet znamená vysoký počet sepnutí za jednotku času. Každé zapnutí a vypnutí spínací součástky má za následek rostoucí ztrátový výkon, jenž je přeměňován na teplo, následné oteplování součástky může zapříčinit snížení

účinnosti. Dalším důsledkem vysokého spínacího kmitočtu mohou být indukovaná napětí, jenž mohou vznikat spínáním indukivních zátěží.

Z důvodu úměrnosti ztrát za jednotku času vůči spínacímu kmitočtu, dosáhneme s rostoucím spínacím kmitočtem bodu, kdy budou ztráty příliš vysoké, čímž se teoreticky určí horní mez spínacího kmitočtu, který se dá použít. Dolní mez nám určuje kmitočet 25kHz jenž se nachází nad pásmem slyšitelnosti. To také můžeme vidět na Obr. 1.



Obr. 1 - Závislost parametrů měniče na kmitočtu [1]

Typy měničů bez galvanického oddělení:

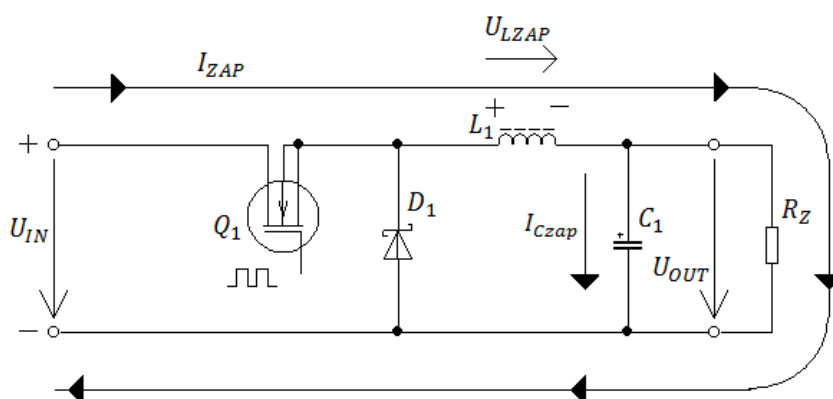
- Snižující měnič (buck)
- Zvyšující měnič (boost)
- Invertující měnič

1.1.1. Snižující měnič (buck) - step down

Jedná se o základní měnič sloužící ke změně napětí směrem dolů (step down). Výstupní napětí U_{OUT} se v tomto případě dá regulovat střídou spínání, a to v rozsahu $D = 0 \div 100\%$. Konstrukce měničů s tímto druhem zapojení se využívá do výkonů okolo 50W.

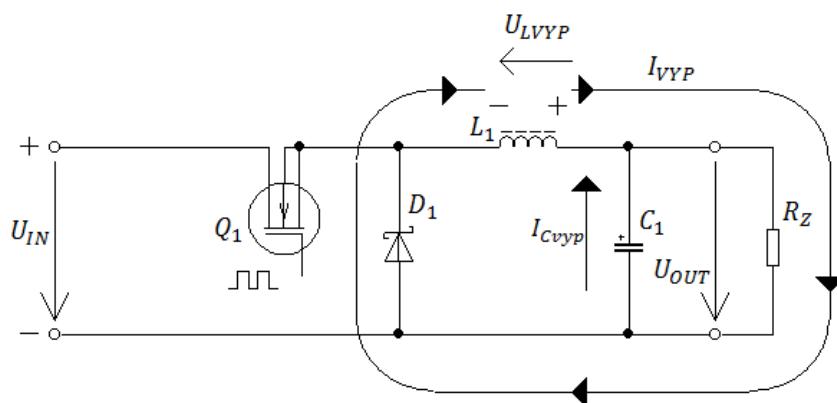
Popis funkce

Po dobu sepnutí spínacího prvku Q_1 nám teče proud I_{ZAP} ze zdroje U_{IN} cívkou L_1 do zátěže R_Z . Cívka L_1 se nám chová jako spotřebič, napětí na ní má stejnou polaritu jako protékající proud (akumuluje se v ní energie). Během tohoto intervalu také teče proud do kondenzátoru a ten se nabíjí.



Obr. 2 - Snižující měnič - Tranzistor Q_1 sepnut (schémata převzata a upravena z [1])

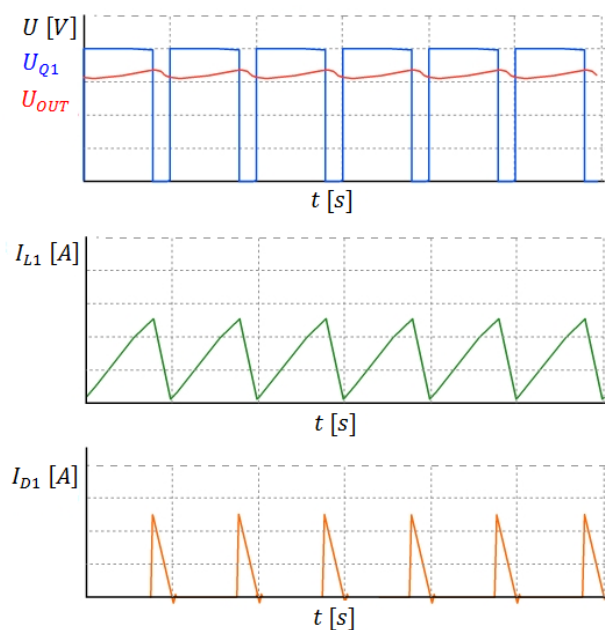
V době, kdy je spínací prvek Q_1 rozepnut, polarita napětí na cívce L_1 se obrátí z U_{LZAP} na U_{LVYP} a cívka L_1 se stává zdrojem, přičemž proud I_{VYP} zachová svůj směr a obvod se uzavírá přes diodu D_1 . Kondenzátor C_1 se nyní vybíjí do zátěže R_Z a proud I_{Cvyp} posílí proud I_{VYP} tekoucí cívkou do zátěže.



Obr. 3 - Snížující měnič - Tranzistor Q_1 rozepnut

Během sepnutého spínacího prvku Q_1 nám výstupní napětí U_{OUT} roste a naopak během vedení diody D_1 klesá. Poměr doby, kdy je sepnut spínací prvek a periody T se nazývá střída a označujeme ji δ (1.1).

$$\delta = \frac{t_{Q1}}{T} \quad (1.1)$$



Obr. 4 - Snížující měnič - časové průběhy vybraných veličin [3]

Průběhy jsou vyobrazeny pro zapojení pracujícím se spojitým proudem (proud cívky neklesne až k nule). Zanedbáme-li úbytky napětí na diodě D_1 a na spínacím prvku Q_1 , můžeme pro výstupní napětí určit rovnici (1.2)

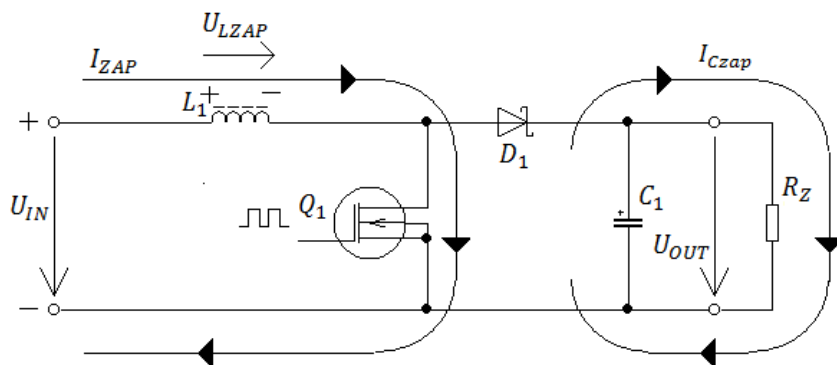
$$U_{OUT} = \frac{t_{Q1}}{T} \cdot U_{IN} \quad [V] \quad (1.2)$$

1.1.2. Zvyšující měnič (boost) - step up

Tento typ měniče řadíme mezi nepřímé měniče, a to z důvodu akumulace energie v magnetickém poli cívky. Změna napětí je zde prováděna nahoru (step up), výstupní napětí U_{OUT} je tedy vyšší, než napětí vstupní U_{IN} .

Popis funkce

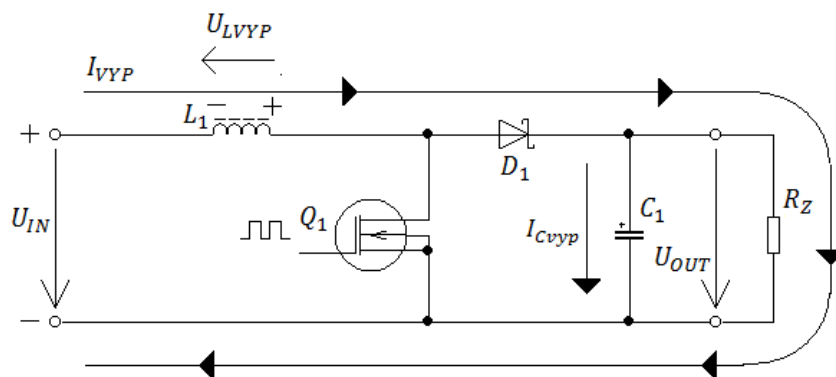
V době, kdy je sepnut spínací prvek Q_1 nám lineárně roste zapínací proud I_{ZAP} (za předpokladu neměnícího se vstupního napětí U_{IN}). Na cívce L_1 se začne akumulovat energie (chová se jako spotřebič), což je způsobeno protékajícím proudem I_{ZAP} a napětím U_{LZAP} . Proud do zátěže je dodáván z kondenzátoru C_1 .



Obr. 5 - Zvyšující měnič - Tranzistor Q_1 sepnut

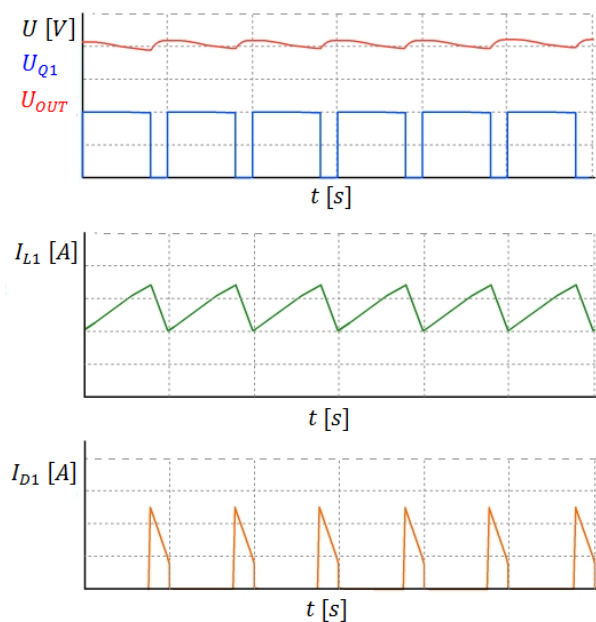
Při rozepnutí spínacího prvku Q_1 nám proud teče ze zdroje U_{IN} a z cívky L_1 do zátěže. Výstupní napětí U_{OUT} je dáno součtem dílčích zdrojů v obvodu, jenž jsou v tuto chvíli vstupní zdroj U_{IN} a cívka L_1 , chovající se jako zdroj. V této chvíli protéká

proud do zátěže a výstupního kondenzátoru C_1 . Vybíjení kondenzátoru C_1 přes spínací prvek Q_1 (ve chvíli, kdy je Q_1 sepnut), nám zabraňuje dioda D_1 .



Obr. 6 - Zvyšující měnič - Tranzistor Q_1 rozeprt

Velkými výhodami tohoto typu zapojení jsou nízká cena, jednoduchost (nízký počet součástek), absence transformátoru a poměrně dobrá schopnost zvýšení výstupního napětí. Jedinými nevýhodami jsou ne příliš vysoké rozsahy výkonů a vyšší výstupní zvlnění.

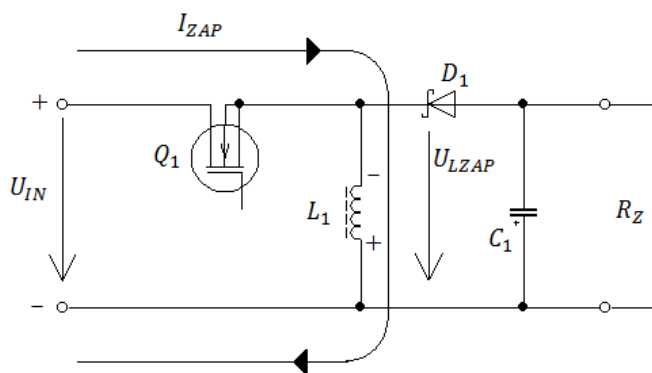


Obr. 7 - Zvyšující měnič- časové průběhy [3]

1.1.3. Invertující měnič

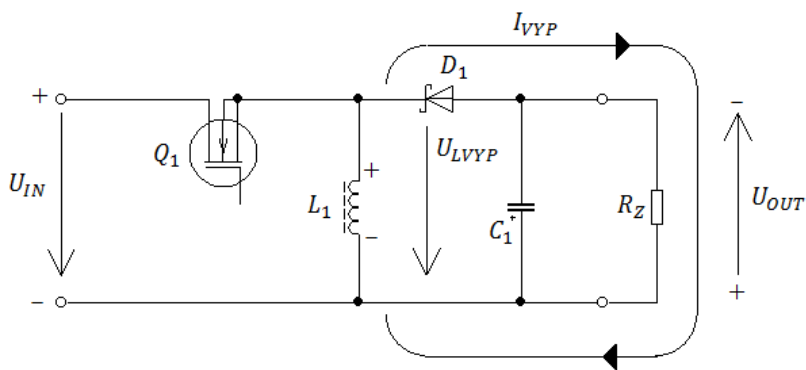
Již podle svého názvu můžeme usuzovat, že se jedná o zapojení, které převrací polaritu výstupního napětí oproti vstupnímu. Princip funkce můžeme rozdělit do dvou fází:

První fáze - spínací prvek Q_1 je sepnut a dioda D_1 je polarizována v závěrném směru a proud tedy teče do cívky L_1 , na níž se indukuje napětí U_{LZAP} , které je shodné s protékajícím proudem (cívka se chová se jako spotřebič). Do zátěže je dodáván proud z kondenzátoru C_1 a výstupní napětí U_{OUT} klesá.



Obr. 8 - Invertující měnič - Tranzistor Q_1 sepnut

Druhá fáze - ve chvíli, kdy tranzistor rozezne, polarita napětí na cívce se obrátí (cívka se přestane chovat jako spotřebič a přejde do režimu zdroje) směr proudu zůstane zachován a teče přes diodu D_1 do zátěže. Část proudu dobíjí kondenzátor C_1 a výstupní napětí U_{OUT} roste.



Obr. 9 - Invertující měnič - Tranzistor Q_1 rozeznut

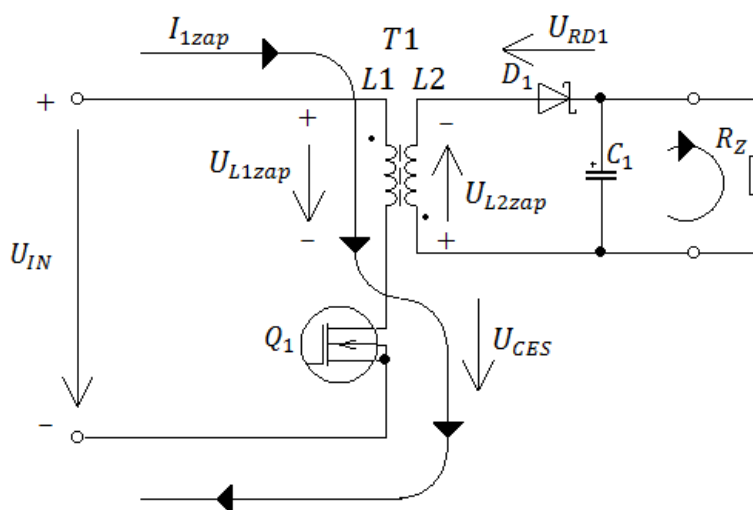
1.2. DC/DC měniče s galvanickým oddělením

DC/DC měničů, které jsou galvanicky odděleny je velká řada, ale tato práce se zabývá jen vybranými typy. K rozhodnutí, abychom použili měnič s galvanickým oddělením (transformátorem) jsme téměř nuceni, protože výše popsané měniče jsou omezeny výkonem, který je limitován cívkou (s rostoucím přenášeným výkonem nám rostou rozměry cívky). Mezi stupněm jsou měniče s odbočkou na cívce, nazývané jako autotransformátor (tj. transformátor, který má galvanicky spojeno primární vinutí se sekundárním).

- Akumulující měnič - flyback
- Propustný měnič - forward

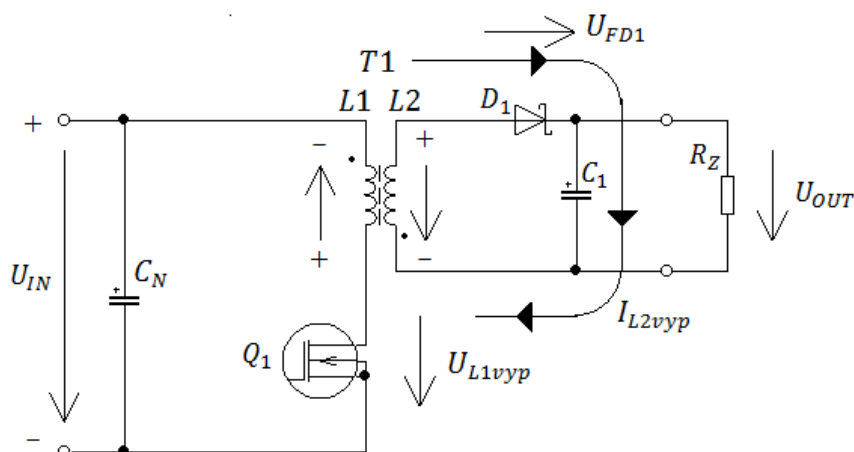
1.2.1. Akumulující měnič

Galvanického oddělení zde dosahujeme tlumivkou, která má přidáno druhé vinutí (funguje tedy jako transformátor), tyto vinutí jsou vinuta proti sobě, což je znázorněno na Obr. 10 (tečkami, které reprezentují začátky vinutí). Měnič může výstupní napětí snižovat i zvyšovat, vše záleží na poměru transformátoru a požadavcích kladených na měnič.



Obr. 10 - Akumulující měnič - Tranzistor Q_1 sepnut

V prvním intervalu, když je sepnut tranzistor Q_1 , po dobu δT teče proud primárním vinutím transformátoru T_1 přes spínací prvek zpět do zdroje. Proud I_{L1zap} roste lineárně za předpokladu, že napětí U_{L1zap} je konstantní, což je zajištěno stabilním napětím U_{IN} a tedy i úbytkem napětí na sepnutém tranzistoru. Dioda D_1 je polarizována v závěrně (je na ní úbytek napětí U_{RD1}) vůči začátkům vinutí, proto nelze odebírat energii dodanou primární stranou na straně sekundární. Kondenzátor C_1 se vybíjí do zátěže R_Z a jeho napětí klesá.



Obr. 11 - Akumulující měnič - Tranzistor Q_1 rozepnut [2]

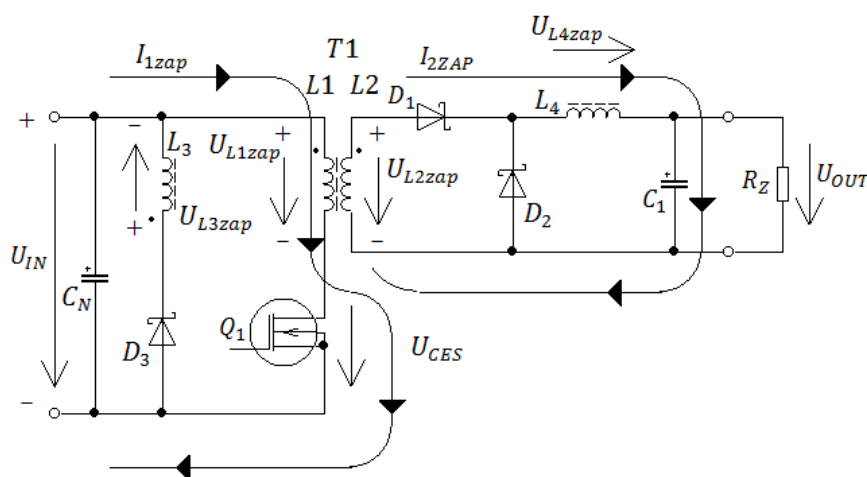
V druhém intervalu trávající dobu $(1 - \delta) \cdot T$ se tranzistor Q_1 rozezne, proud I_{L1zap} zanikne a polarita napětí na primárním vinutí se obrátí z U_{L1zap} na U_{L1vyp} . Stejný děj proběhne na sekundární straně transformátoru. Nyní má napětí U_{L2vyp} takovou polaritu, že dioda D_1 je polarizována propustně (je na ní úbytek U_{FD1}). Diodou začíná téct proud I_{L2vyp} , který teče do zátěže R_Z a kondenzátoru C_1 , jímž je nabíjen a výstupní napětí U_{OUT} tedy roste.

Mezi základní a největší výhody tohoto měniče patří fakt, že z poměrně malého vstupního napětí lze snadno udělat velké výstupní napětí. U tohoto zapojení není třeba výstupní tlumivku, protože její účel nahrazuje transformátor.

Avšak koncepce se využívá pouze pro poměrně malé výkony (okolo 150W). Další nevýhodou je vysoké sycení jádra, které je nepřímo úměrné přenášenému výkonu.

1.2.2. Propustný měnič

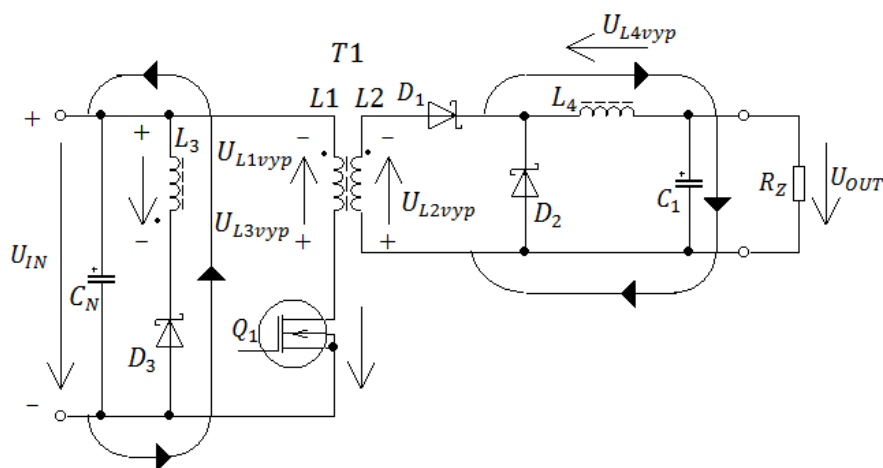
Tato koncepce měniče je uzpůsobena k tomu, aby bylo možné odebírat elektrickou energii ze sekundárního vinutí L_2 transformátoru T_1 ve chvíli, kdy je dodávána do primárního vinutí L_1 (tranzistor Q_1 je sepnut). Z tohoto důvodu je možné, aby transformátor byl rozměrově menší, to proto, že se v něm neakumuluje plná velikost výkonu, který je nutno přenést po dobu sepnutého tranzistoru Q_1 . Avšak výpočet takového transformátoru je poměrně složitý, protože akumulace energie a její odběr je časově nelineární. Během intervalu, kdy je rozeprnut spínací prvek na primárním vinutí narůstá napětí a ohrožuje jej. Spínací prvek je nutno chránit, ale ne ochranným obvodem, ale rekuperačním vinutím.



Obr. 12 - Propustný měnič - Tranzistor Q_1 sepnut [2]

V prvním intervalu je tranzistor Q_1 sepnut a proud teče primárním vinutím L_1 transformátoru T_1 přes tranzistor zpět do zdroje. Protože začátky vinutí cívek L_1 a L_2 jsou shodně orientovány (tečky označující jejich počátek), dioda D_1 je vůči napětí na sekundární straně polarizována propustně a proud I_{2zap} teče přes tlumivku L_4 a kondenzátor C_1 (tvořící výstupní LC filtr) do zátěže R_Z . Pomocným (tzv. rekuperačním) vinutím L_3 díky polarizaci diody D_3 v tomto intervalu neteče žádný proud.

Ve chvíli rozepnutí tranzistoru Q_1 , se obrátí polarita napětí na všech vinutích transformátoru T_1 (L_1 , L_2 , L_3). Proud, který tekł ze sekundárního vinutí transformátoru T_1 přes diodu D_1 do zátěže zanikne. Tlumivka L_4 přejde z režimu spotřebiče do režimu zdroje, obrátí se na ni polarita napětí z U_{Lzap} na U_{Lvyp} a výstupní proud poteče do zátěže přes diodu D_2 . Proud kondenzátorem změní polaritu a přičítá se k proudu tekoucímu tlumivkou L_4 do zátěže. Výstupní napětí U_{OUT} v tomto intervalu klesá.



Obr. 13 - Propustný měnič - Tranzistor Q_1 rozeprt

Jako ochrana tranzistoru proti rychle rostoucímu napětí U_{L1vyp} a s ním i napětí na tranzistoru Q_1 což by pro něj mohlo být smrtící, se dají použít ochranné obvody v podobě zenerových diod nebo RC článků sloužících jako přepět'ové ochrany. Zde je jako ochrana použito vinutí L_3 u transformátoru T_1 a dioda D_3 , což tvoří tzv. rekuperační větev. Vinutí L_3 zatěžuje transformátor a zajišťuje, aby se energie nemařila pasivně a vrací ji tedy do obvodu. Dioda D_3 zajišťuje funkci rekuperačního vinutí pouze v intervalu, kdy je tranzistor Q_1 rozeprt.

Výkon tohoto měniče se pohybuje okolo 250W, ale spínací prvek zde musí být napět'ově dimenzován na minimálně dvakrát vyšší napětí.

1.3. Shrnutí měničů

Použití některých měničů, jako samostatných jednotek se jeví jako dostačující, ale mnohdy se využívá řazení těchto měničů, jak kaskádně, tak modulárně. Jednotlivé galvanicky neoddělené měniče mají jak víme poměrně velkou účinnost, ale pouze pro relativně malé přenášené výkony. Tuto nevýhodu lze vyřešit modulárním řazením více měničů o menších výkonech se společným přesezeným řízením.

Pro nejefektivnější využití zvyšujícího měniče je zapotřebí přivádět pokud možno stálé vstupní napětí, což můžeme zajistit kaskádním řazením snižujícího a zvyšujícího měniče. Osvět solárních panelů může být nerovnoměrný a napětí tedy kolísá, tím pádem jsme schopni napětí snížit například z 36V na 12V, to s poměrně vysokou účinností a přes akumulátor s velkým počtem cyklů, který by sloužil jako velmi dobrý meziobvod. Následně by byl zdrojem napětí pro zvyšující měnič, který by pracoval s velmi dobrou účinností. Zvyšující měniče se nejčastěji využívají pro změnu napětí nahoru

Snižující měniče pracují s poměrně velkou účinností, ale pouze pro malé výkony. Oproti nim stojí zvyšující měnič, jenž zvládne zvýšit výstupní napětí oproti vstupnímu na hodnotu přibližně 5x vyšší, a to s účinností okolo až 92%. Tyto měniče však mají nevýhodu galvanického spojení.

Již pro vyšší výkony jsou koncepce měničů které používají impulsní transformátory, což jsou transformátory stavěné na vysoké kmitočty. Účinnost těchto měničů je taktéž vysoká, a možné přenášené výkony se pohybují ve stovkách wattů.

Pro nejvyšší výkony se využívají můstkové měniče, polo-mosty a plno-mosty. Jejich výkony se pohybují okolo jednotek kilowattu a výše.

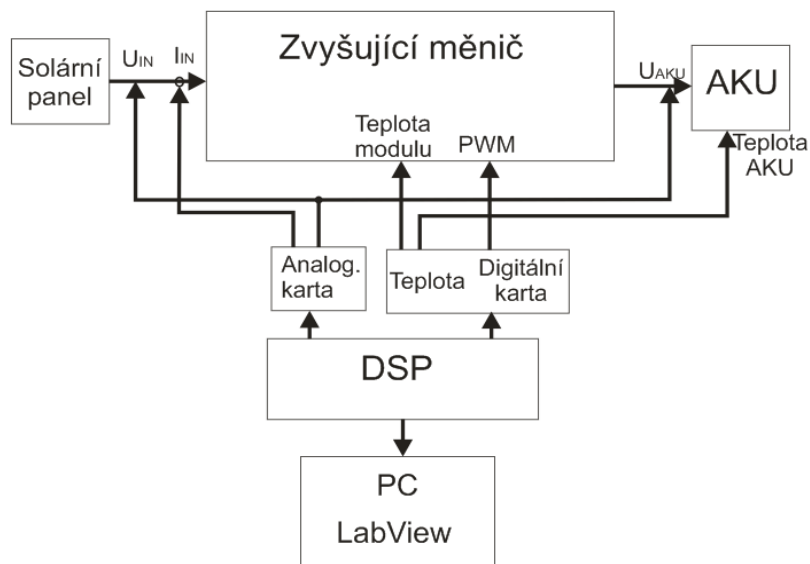
2. NÁVRH VÝKONOVÉ ČÁSTI DC/DC MĚNIČE

Po zvážení všech možných koncepcí měničů byl pro realizaci vybrán zvyšující měnič napětí, který není galvanicky oddělen. Rozhodnutí navrhnout a sestavit tento typ měniče bylo ovlivněno jeho poměrnou jednoduchostí zapojení (nízký počet součástek) a vysokou účinností.

Jedním z nejdůležitějších kritérií při návrhu a realizaci zvyšujícího DC/DC měniče nebo měniče obecně je volba vhodného spínacího kmitočtu, který nám dále bude ovlivňovat jednak přenášený výkon, tak i možné použitelné součástky.

Tato kapitola bude rozdělena na:

- Výpočet parametrů měniče
- Simulace měniče
- Návrh a dimenzování součástek
- Návrh a výpočet chladiče
- Pomocné a ochranné obvody měniče
- Návrh měniče v programovém prostředí Eagle



Obr. 14 -Blokové schéma měniče s připojeným řídicím systémem [10]

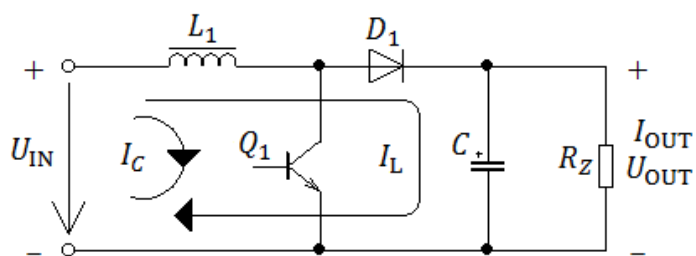
2.1. Výpočet parametrů měniče (výpočet tlumivky)

Jako zdroj napětí je použit fotovoltaický panel, s výstupním napětím $30\text{ V} \pm 20\%$ a musíme dosáhnout stabilizovaného výstupního napětí 96 V se stálým odběrem okolo proudu $1,5\text{ A}$. Návrh je proveden pro spínací kmitočet 200 kHz . Měnič nebude galvanicky oddělen a zvlnění výstupního proudu by se mělo pohybovat okolo $0,1\text{ A}$.

Tab. 1 - Zadané parametry pro výpočet tlumivky zvyšujícího DC/DC měniče

U_{IN}	$30\text{ V} \pm 20\%$
U_{INmin}	24 V
U_{INmax}	36 V
U_{OUT}	96 V
I_{OUT}	$1,5\text{ A}$
ΔI_{L}	$0,1\text{ A}$
f_{sw}	200 kHz
T	$5\text{ }\mu\text{s}$

Návrh vychází ze schématu uvedeném na Obr. 15



Obr. 15 - Schéma z pro výpočet parametrů měniče

Výstupní napětí určíme vztahem:

$$U_{OUT} = U_{IN} \cdot \frac{1}{1-\delta} \quad (2.1)$$

Ideální poměr střidy δ (činitele plnění) určíme ze vztahu (2.1) a to pro minimální i maximální vstupní napětí:

$$\delta_{min} = 1 - \frac{U_{INmax}}{U_{OUT}} \quad (2.2)$$

$$\delta_{max} = 1 - \frac{U_{INmin}}{U_{OUT}} \quad (2.3)$$

Po dosazení do rovnic (2.2) a (2.3) s uvážením úbytku napětí na spínacím prvku, a na diodě dostaneme:

$$\delta_{min} = 1 - \frac{36-2}{96+1} = 0,65 \quad (2.4)$$

$$\delta_{max} = 1 - \frac{24-2}{96+1} = 0,77 \quad (2.5)$$

Známe-li činitele plnění pro minimální a maximální hodnoty napětí, můžeme vypočítat potřebnou hodnotu indukčnosti:

$$L_1 = \frac{U_{INmax} \delta_{min} T}{\Delta I_L} = \frac{(36-5) \cdot 10^{-6} \cdot 0,65}{0,1} = 201,5 \mu H \quad (2.6)$$

$$L_1 = \frac{U_{INmin} \delta_{max} T}{\Delta I_L} = \frac{(24-5) \cdot 10^{-6} \cdot 0,77}{0,1} = 146,3 \mu H \quad (2.7)$$

Použijeme tlumivku s indukčností $L = 220 \mu H$ dimenzovanou na vyšší hodnotu proudu a určíme zvlnění proudu, které je potřeba k výpočtu maximálního proudu, pro mezní hodnoty napětí.

$$\Delta I_{Lmax} = \frac{U_{INmax} \delta_{min} T}{L_1} = \frac{(36-5) \cdot 10^{-6} \cdot 0,65}{220 \cdot 10^{-6}} = 0,092 A \quad (2.8)$$

$$\Delta I_{Lmin} = \frac{U_{INmin} \delta_{max} T}{L_1} = \frac{(24-5) \cdot 10^{-6} \cdot 0,77}{220 \cdot 10^{-6}} = 0,067 A \quad (2.9)$$

Dále zjistíme mezní hodnoty proudu, jenž potečou tlumivkou, a to pro obě krajní hodnoty napájecího napětí. Řešení bude vycházet ze vzorců (2.10) a (2.11):

$$T \cdot I_{OUT} = \frac{I_{Lmax} + I_{Lmin}}{2} \cdot (1 - \delta) \cdot T \quad (2.10)$$

$$\Delta I_L = I_{Lmax} - I_{Lmin} \quad (2.11)$$

Pro $U_{INmax} = 36 V$ můžeme si pomoci drobnými matematickými úpravami a vykrátit periodu T , která je na obou stranách rovnice, poté dostaneme:

$$I_{OUT} = \frac{I_{Lmax} + I_{Lmin}}{2} \cdot (1 - \delta_{min}) \quad (2.12)$$

$$\Delta I_{Lmax} = I_{Lmax} - I_{Lmin} \quad (2.13)$$

Řešením těchto dvou rovnic (2.12) a (2.13) o dvou neznámých I_{Lmax} a I_{Lmin} získáme hodnoty minimálního a maximálního proudu, tekoucího tlumivkou:

$$1,5 = \frac{I_{Lmax} + I_{Lmin}}{2} \cdot (1 - 0,65)$$

$$0,092 = I_{Lmax} - I_{Lmin}$$

$$0,35 \cdot I_{Lmax} + 0,35 \cdot I_{Lmin} = 3 \quad / \times 100$$

$$I_{Lmax} - I_{Lmin} = 0,092 \quad / \times 35$$

$$35 \cdot I_{Lmax} + 35 \cdot I_{Lmin} = 300$$

$$35 \cdot I_{Lmax} - 35 \cdot I_{Lmin} = 3,22$$

$$I_{Lmax} = \frac{303,22}{70} = 4,33 A$$

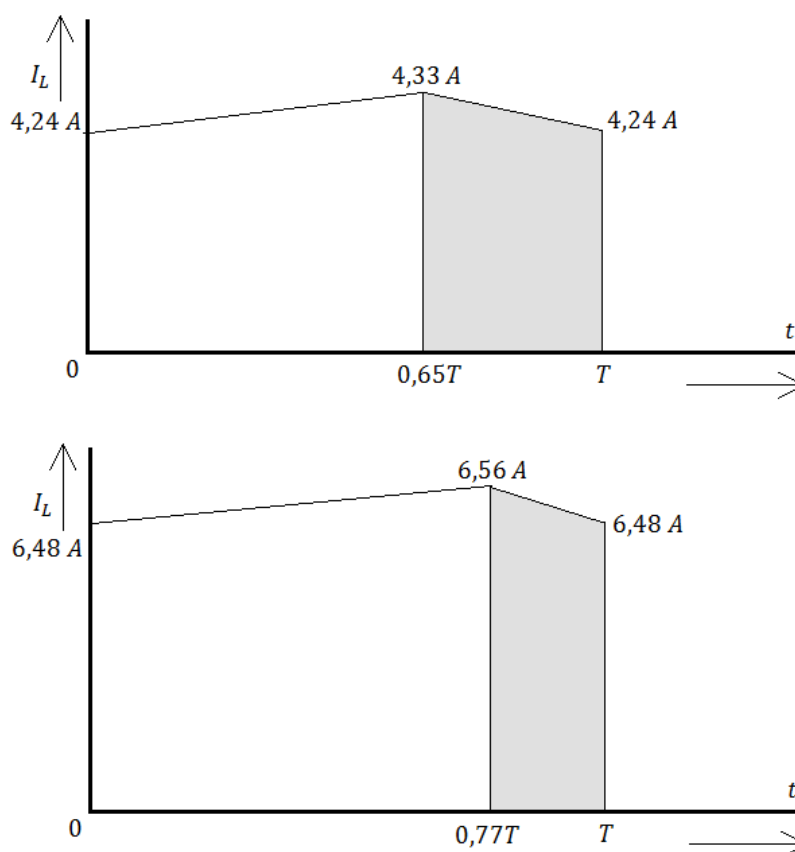
$$I_{Lmin} = \frac{300 - 35 \cdot I_{Lmax}}{35} = 4,24 A$$

Stejný postup se provede pro vstupní napětí $U_{INmin} = 24 V$ a vyjdou hodnoty:

$$I_{Lmax} = 6,56 A$$

$$I_{Lmin} = 6,48 A$$

Na (Obr. 16) vidíme proud (jeho zvlnění), který nám teče tlumivkou. Bílá část vyobrazuje dobu, po kterou vede spínací prvek a šedě je proud diodou.



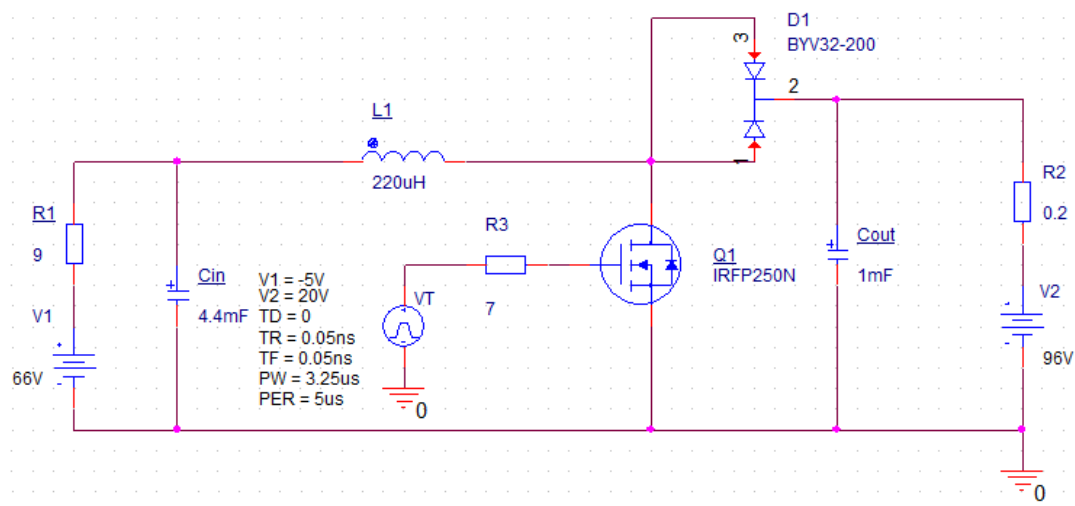
Obr. 16 - Vypočtený proud tekoucí tlumivkou

Z výpočtů můžeme vidět, že proud tekoucí tlumivkou dosahuje hodnot $I = 6,5\text{ A}$, musíme tedy tlumivku dostatečně dimenzovat. Protože návrh tlumivky je zdlouhavý a její výroba značně náročná, přiklonil jsem se k řešení koupit tlumivku s dostatečnými parametry již hotovou.

Princip výpočtu tlumivky převzato z [7]

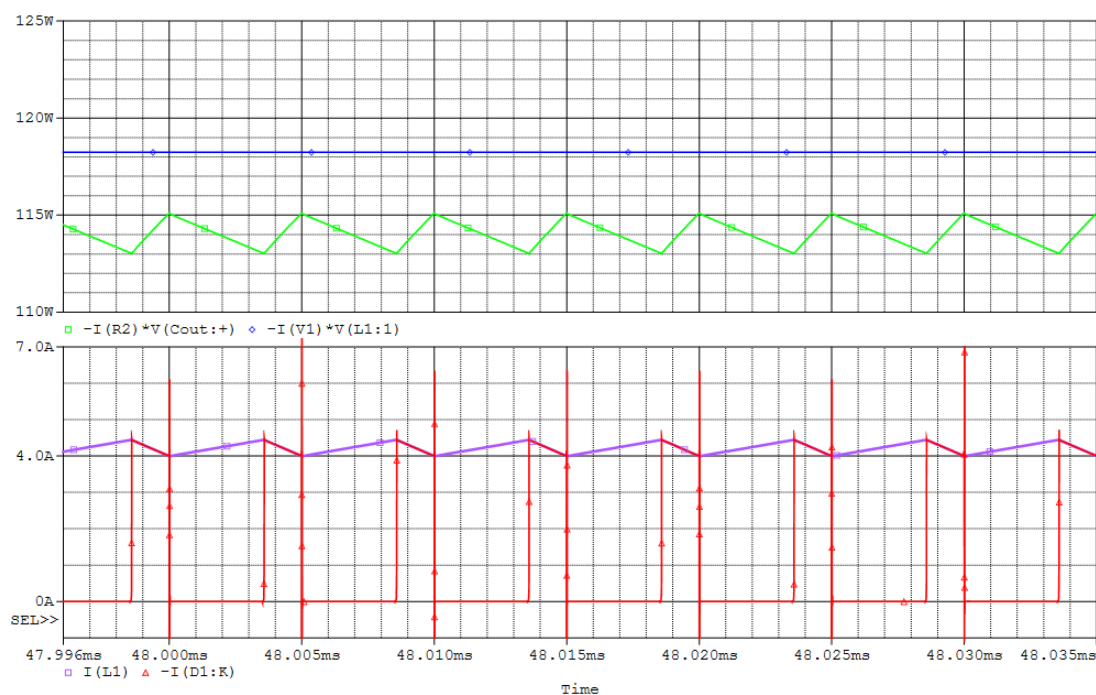
2.2. Simulace navrženého měniče

Navržený měnič byl namodelován v prostředí OrCAD PSpice. Simulace byly prováděny s reálnými prvky. Jako spínací prvek je využit výkonový unipolární N-MOSFET tranzistor, jako dioda byla vybrána ultra rychlá dvou anodová dioda, obě tyto součástky splňují proudové i napěťové dimenzování a dále budou specifikovány. Pro buzení tranzistoru byl použit generátor pulzů. Velikost budícího napětí bylo odečteno z datového listu udávaného výrobcem.



Obr. 17 -Model zvyšujícího měniče v prostředí OrCAD

Vstupní část odvodu - zdroj napětí $V1$ a rezistor $R1$ nám interpretují fotovoltaický panel a jeho přibližný vnitřní odpor, s nímž se musí počítat. Výstupní napětí je stabilizováno pomocí akumulátoru, který je nahrazen zdrojem napětí $V2$ a charakterizován svým vnitřním odporem $R2$.



Obr. 18 - Průběhy simulace vybraných veličin - $U_{IN} = 24 \text{ V}$

Legenda k Obr. 11 a Obr. 12:

$(I(V1) * V(L1:1))$	- Vstupní výkon	(Modrá)
$(I(R2) * V(Cout: +))$	- Výstupní výkon	(Zelená)
$I(D1:K)$	- Proud tekoucí diodou	(Červená)
$I(L1)$	- Proud tekoucí tlumivkou	(Fialová)

Na Obr. 18 jsou vyobrazeny průběhy výkonů, z nichž jsme schopni určit přenášený výkon, respektive účinnost měniče. Také je zobrazen proud tekoucí tlumivkou a také proud na diodě. Během simulace nedosahuje proud na tlumivce vypočtených hodnot, ale pro další návrhy se musí počítat a dimenzovat pro vyšší proud, který může vzniknout při silnějším osvitu fotovoltaických panelů.

Účinnost měniče můžeme určit ze vztahu:

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \quad (2.14)$$

Účinnost měniče při vstupním napětí 24 V a výstupním napětí 96 V je:

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \cdot 100\% = \frac{114}{118} \doteq 96\% \quad (2.15)$$

Účinnost měniče při vstupním napětí 36 V a výstupním napětí 96 V je:

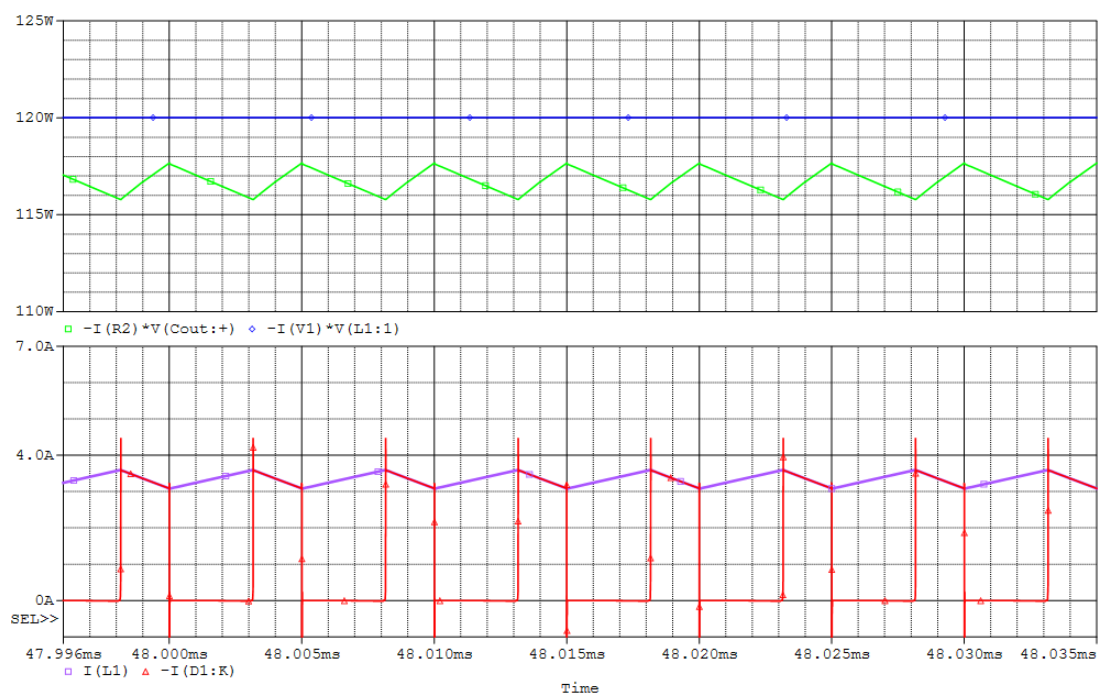
$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \cdot 100\% = \frac{115}{120} \doteq 96\% \quad (2.16)$$

Přičemž vstupní výkon P_{IN} a výstupní výkon P_{OUT} vypočteme podle vztahu:

$$P_{IN} = U_{IN} \cdot I_{IN} \quad (2.17)$$

$$P_{OUT} = U_{OUT} \cdot I_{OUT} \quad (2.18)$$

Obě tyto účinnosti jsou sice jenom teoretické a orientační, ale měnič bude konstruován pro nízké výkony (150W), tedy účinnost by se měla pohybovat v rozmezí okolo 90% až 95%.



Obr. 19 - Průběhy simulace vybraných veličin - $U_{IN} = 36 V$

Na Obr. 19 můžeme vidět, že proud protékající tlumivkou je menší než v předchozím případě, protože napětí, které se musí naindukovat je menší. Což vyplývá z následující rovnice:

$$U_{ind} = U_{OUT} - U_{IN} = -L_1 \cdot \frac{dI_{Lvypr}}{t_2} \quad (2.17)$$

,kde dI_{L2} je strmost poklesu proudu na tlumivce, v době vedení diody. A t_2 ($T - \delta T$) je doba, kdy proud tlumivkou klesá (proud vede dioda). Naopak strmost nárůstu proudu dI_{L1} , jenž bude trvat dobu t_1 (δT):

$$dI_{Lzap} = \frac{1}{L_1} \cdot \int_0^{\delta T} U_{IN} dt = U_{IN} \cdot \frac{t_1}{L_1} \quad (2.18)$$

$$dI_{Lvypr} = \int_{\delta T}^T \frac{(U_{IN} - U_{OUT}) \cdot dt}{L_1} = (U_{IN} - U_{OUT}) \cdot \frac{t_2}{L_1} \quad (2.19)$$

Vstupní kapacita C_{in} pro tzv. vytvrzení fotovoltaického panelu byla zvolena s rozvahou a to podle výsledků simulací. Kdyby se zvolila nízká kapacita, panel by se stále choval jako poměrně velmi měkký zdroj, avšak příliš vysoká kapacita také není vhodná.

2.3. Návrh a dimenzování součástek

Výběr vhodných součástek je jeden z klíčových úkolů při stavbě jakéhokoliv měniče elektrické energie. Součástky je třeba vhodně dimenzovat, aby se proudově a napěťově nepřemáhaly.

Tranzistor:

Jako spínací prvek je využit výkonový unipolární N-MOSFET tranzistor typu *IRFP250N*, který má parametry:

Proudové dimenzování - dle datového listu tranzistor snese proud $I_D = 30 A$ (při teplotě pouzdra $T_C = 25^\circ C$) a $I_D = 21 A$ (při teplotě pouzdra $T_C = 100^\circ C$).

Napět'ové dimenzování - tranzistor je stavěn na napětí $V_{DS} = 200\text{ V}$, Ze vstupní strany je tranzistor namáhán napětím $U_{INmax} = 36\text{ V}$, což je dostatečné. Vede-li dioda D_1 , je tranzistor zatížen výstupním napětím z akumulátoru $U_{OUT} = 96\text{ V}$. Dle těchto úvah lze vyhodnotit, že spínací prvek vyhovuje jak napět'ově, tak proudově.

Dioda:

Jako dioda byla vybrána ultra rychlá dvou anodová dioda *BYV32 – 200* která má parametry: $V_{RRM} = 200\text{ V}$; $I_{F(AV)} = 18\text{ A}$ při $T_C = 100^\circ\text{C}$; a $t_{rr} = 25\text{ ns}$.

Tlumivka:

Dalším nezbytným prvkem měniče je tlumivka, která je stavěna na poměrně vysoký proud.

Typ tlumivky: *DTMSS – 47/0,22/15 – V*.

$$L = 220\text{ }\mu\text{H při } I = 0\text{ A}$$

$$L = 195\text{ }\mu\text{H při } I = 7\text{ A}$$

$$L = 129\text{ }\mu\text{H při } I = 15\text{ A}$$

Tlumivka je dimenzována na vyšší proud, aby se magnetické jádro nepřesycovalo. To znamená že s rostoucím proudem, který poteče tlumivkou se bude zvyšovat magnetický tok, což by mohlo vést k přesycení magnetického obvodu. Hodnoty jednotlivých indukčností pro dané proudy jsou získány z katalogového listu udávaného výrobcem.

Kondenzátory:

Elektrolytické kondenzátory, které jsou použity v obvodu jsou napět'ově dimenzovány na minimálně dvakrát větší napětí. Zvolené kondenzátory vyhovují proudovému namáhání, jenž udává výrobce. Při paralelním řazení se kondenzátorům více ulehčí, poněvadž proud se mezi ně rovnoměrně rozloží.

2.4. Návrh a výpočet chladiče

Návrh chladiče vychází ze ztrátového výkonu, jenž vzniká v polovodičových součástkách, v tomto případě na tranzistoru Q_1 a na diodě D_1 . Teplo které vzniká na PN přechodu je třeba odvést do pouzdra součástky a následně předat chladiči, který tento výkon, již v podobě tepla vyzáří do okolí. Při výpočtu se předpokládá, že jsme schopni zjednodušeně charakterizovat každý krok odvedení tepla. Pro tepelný obvod využíváme analogii s elektrickým obvodem a používáme jako náhradní lineární prvky tepelné odpory odpovídající jednotlivým úsekům.

Zdrojem tepelného toku je ztrátový výkon (analogicky elektrický proud), který na tepelném odporu (elektrický odpor) vyvolá rozdíl teplot (úbytek napětí). Přičtením všech rozdílů teplot k teplotě okolí dostaneme předpokládanou teplotu přechodu při zatížení daným výkonem. Obvykle se používají zkratky a indexy z anglicky psaných katalogů. [8]

Výpočet ztrátového výkonu na Q_1 :

Pro výpočet ztrátového výkonu budeme potřebovat znát maximální proud tekoucí tranzistorem jenž by mohl v nejméně příznivé situaci narůst na hodnotu $I_m = I_{INmax} = 10 \text{ A}$. Dále budeme potřeba z datového listu vypsát hodnotu prahového (otevíracího) napětí tranzistoru $U_{GS(TH)} = 3 \text{ V}$ a vnitřní odpor tranzistoru v sepnutém stavu $r_{DS(ON)} = 0,075 \Omega$. Ztrátový výkon tedy vypočteme podle:

$$P_{TOT} = I_{F(AV)} \cdot U_{GS(TH)} + I_{FRMS}^2 \cdot r_{DS(ON)} \quad (2.20)$$

Abychom mohli dosadit do vztahu (2.20) musíme znát střední hodnotu propustného proudu $I_{F(AV)}$ a efektivní hodnotu propustného proudu I_{FRMS}^2

$$I_{F(AV)} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T I_m(t) dt \quad (2.21)$$

$$I_{FRMS}^2 = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T I_m^2(t) dt \quad (2.22)$$

Dobu po kterou spínacím prvkem teče proud určíme dle maximální doby sepnutí $\delta_{max} = 0,77$ zaokrouhlené na hodnotu $\delta_{max} = 0,8$ (tranzistor vede proud 80% doby periody). Což vyplývá s následujícího obrázku.



Obr. 20 - Doba vedení proudu spínacím prvkem (označeno šedou barvou)

Ze vztahů (2.21) a (2.22) získáme hodnoty proudů a následně dosadíme do vztahu (2.20) a tak získáme ztrátový výkon tranzistoru:

$$I_{F(AV)} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^{\frac{4}{5}T} I_m(t) dt = 8 A \quad (2.23)$$

$$I_{FRMS}^2 = \frac{1}{T} \cdot \int_0^{\frac{4}{5}T} I_m^2(t) dt = 80 A^2 \quad (2.24)$$

$$P_{TOT} = 8 \cdot 3 + 80 \cdot 0,075 = 30 W \quad (2.25)$$

Výpočet ztrátového výkonu na diodě D_1 :

Ztrátový výkon na diodě by se vypočetl analogicky jako na tranzistoru, tento ztrátový výkon vychází přibližně 20W. Protože tranzistor a dioda nevedou spolu po celou dobu periody, můžeme navrhovat chladič pouze pro součástku s vyšším ztrátovým výkonem.

Výpočet chladiče:

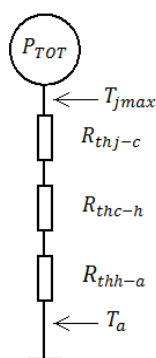
$$P_{TOT} = 30W$$

$$T_a = 30^{\circ}C$$

$$T_{jmax} = 175^{\circ}C$$

$$R_{thj-c} = 0,7KW^{-1}$$

$$R_{thc-h} = 0,05KW^{-1}$$



Obr. 21 - Teplotní schéma obvodu pro tranzistor

Teplotní odpor chladiče, který bude schopen vyzářit daný ztrátový výkonu určíme vztahem:

$$R_{thh-a} = \frac{T_{jmax} - T_a}{P_{TOT}} - (R_{thj-c} + R_{thc-h}) \quad (2.26)$$

$$R_{thh-a} = \frac{175-30}{30} - (0,7 + 0,05) = 4,08KW^{-1} \quad (2.27)$$

Je tedy nutno vybrat chladič s tepelným odporem $R_{thh-a} \leq 4,08KW^{-1}$.

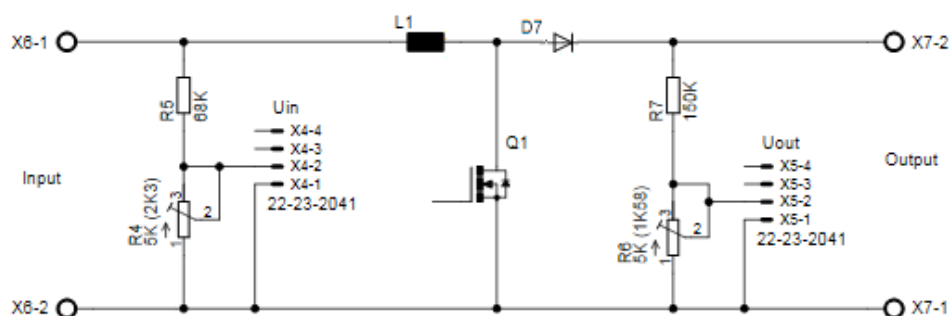
Vhodný chladič, který by byl nejspíš zvolen by byl SK48-50-SA-3 teplotním odporem $R_{thh-a} = 2,9KW^{-1}$, ale při měření nebylo oteplení spínací součástky tak veliké (teplota dosahovala hodnot kolem $T = 50^{\circ}C$), byl použit momentálně dostupný chladič s teplotním odporem $R_{thh-a} = 4,3KW^{-1}$, který je dostačující.

2.5. Pomocné a ochranné obvody měniče

Navrhovaný DC/DC měnič se neskládá pouze ze zvyšujícího měniče, ale má kolem sebe řadu pomocných a ochranných obvodů, nejen pro správnou funkci, ale i pro ochranu měniče samotného.

Měření vstupního a výstupního napětí

Měření vstupního napětí je prováděno přes odporový dělič s převodem 10:1. Desetkrát zmenšené napětí je přiváděno na vstup A/D převodníku signálového procesoru, pomocí něhož je ovládán spínací prvek. Měření výstupního napětí je řešeno stejným způsobem, ale z důvodu maximálního vstupního napětí A/D převodníku což je 5V měnicí poměr je nastaven na 30:1.



Obr. 22 - Princip měření napětí

Výpočet odporového děliče vychází ze vztahu:

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.28)$$

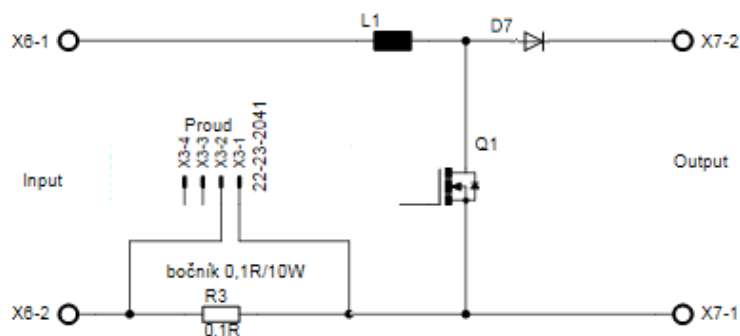
Pro tento případ se vycházelo:

$$U_{x41-2} = U_{IN} \cdot \frac{R_4}{R_4 + R_5} \quad (2.29)$$

$$U_{x51-2} = U_{OUT} \cdot \frac{R_6}{R_6 + R_7} \quad (2.30)$$

Měření vstupního proudu

Vstupní proud je získáván dopočítáním z úbytku napětí na odporovém bočníku, který je umístěn v záporné větvi obvodu. Mírnou odchylku lze vykompenzovat softvérovými metodami.



Obr. 23 - Princip měření proudu

Místo obou těchto metod lze použít vhodné proudové a napětové snímače, avšak pro tuto aplikaci je toto řešení dostačující. A/D převodníky mají dostatečně vysoké rozlišení, a měřený signál bude dostatečně přesný pro další použití.

Jištění obvodu proti přepětí

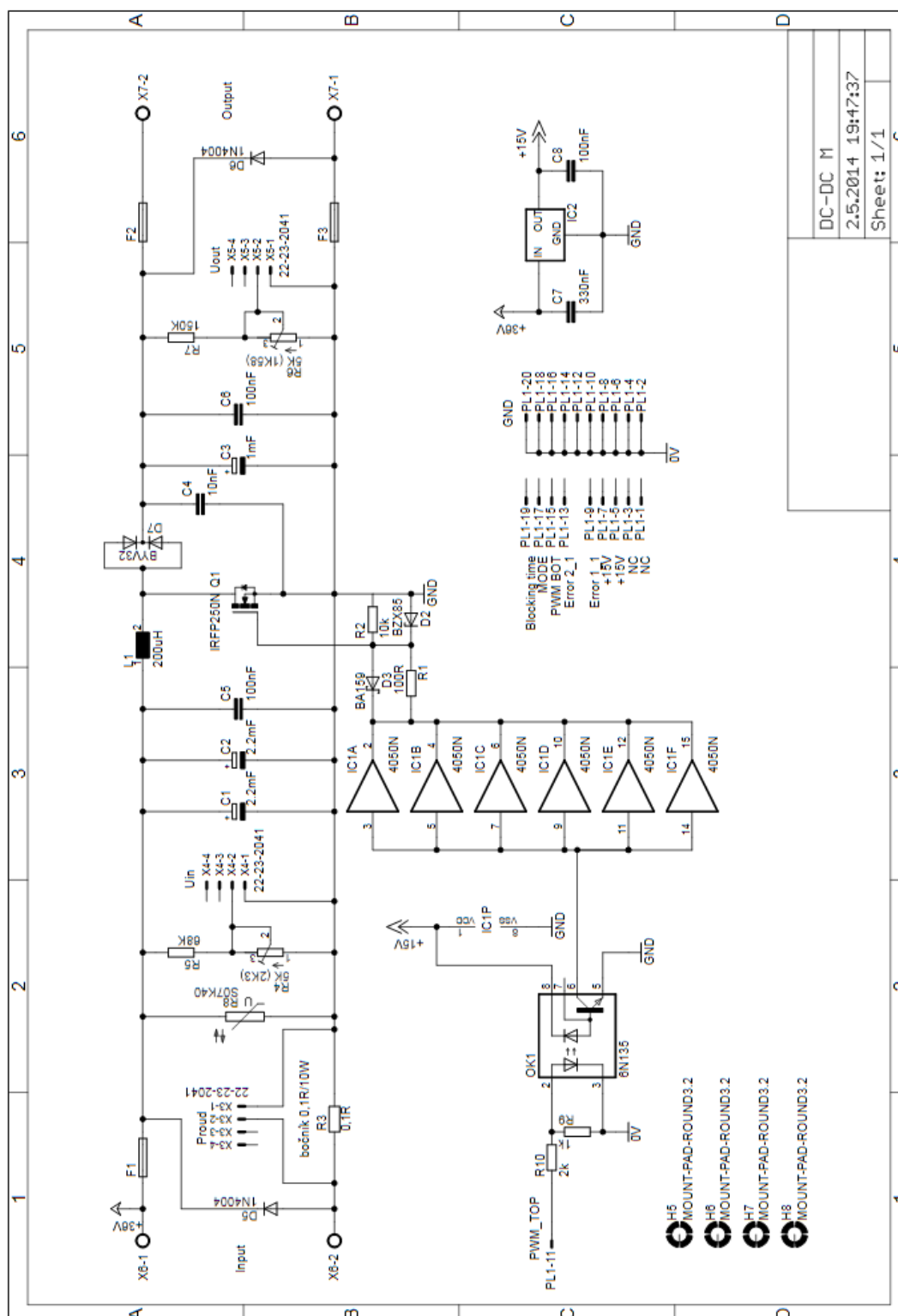
Nejvhodnějším způsobem jištění proti přepětí je paralelní zařazení varistoru na vstup obvodu a to za vstupní pojistku F1. Varistor pracuje jako omezovač napětí, které může vzniknout na fotovoltaickém panelu (atmosférické děje). Výstupní stranu měniče není třeba napětově chránit, protože je připojena na akumulátor, který má pevně dané svorkové napětí.

Jištění obvodu proti nadproudu a přepólování

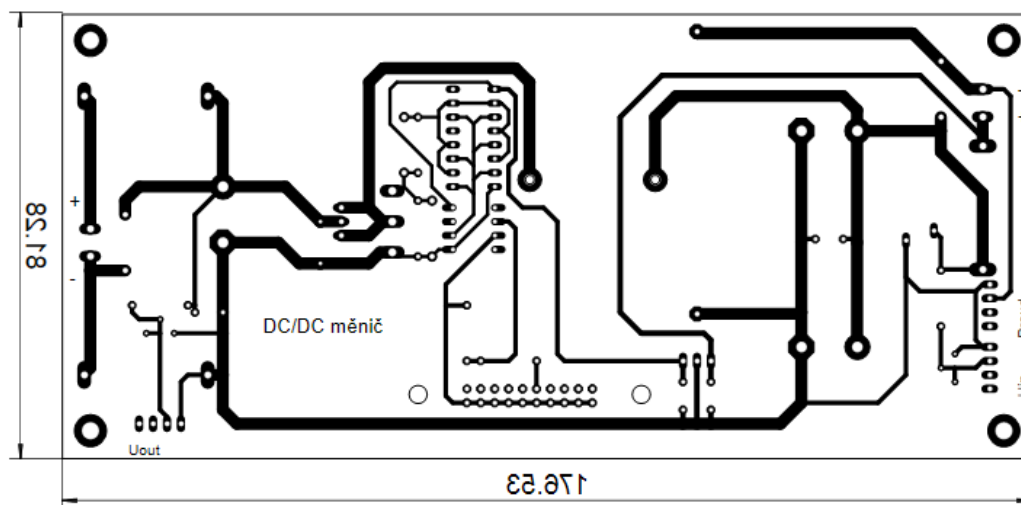
Na vstup je navrženo jednopólové jištění, s pojistkou o hodnotě 10A, což je dostatečná hodnota vezmeme-li v úvahu vstupní proud. Výstup je chráněn dvoupólově.

Na vstupu i na výstupu jsou připojeny ochranné diody, které slouží jako ochrana proti přepólování. Připojí-li se opačná polarita napětí na vstupní nebo výstupní svorky, proud poteče diodou, přes pojistku a ta se následkem velkého proudu přetaví. Výstupní strana je řečena stejným principem.

2.6. Schéma DC/DC měniče

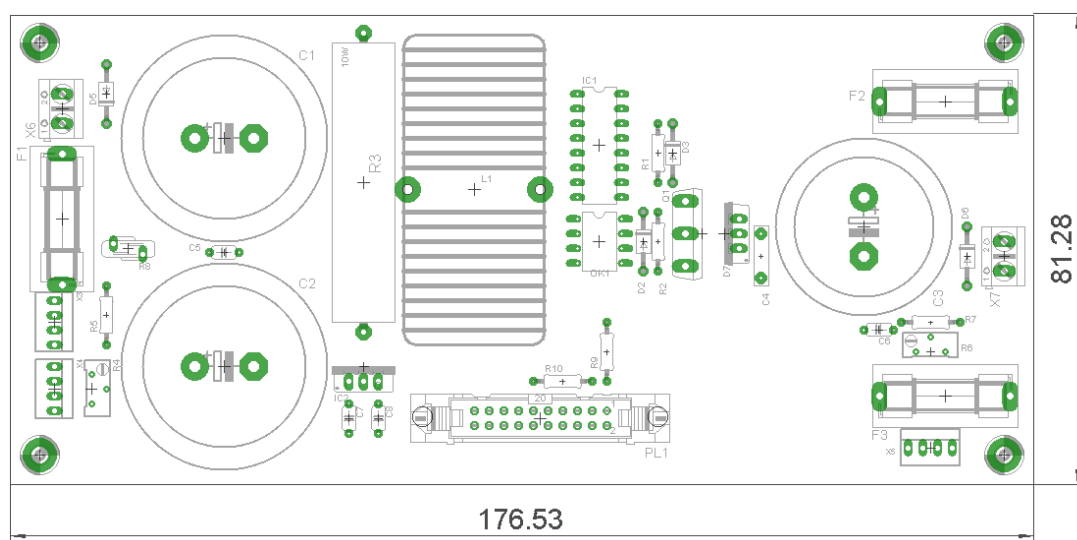


Obr. 26 - Obvodové schéma DC/DC měniče



Obr. 27 - DPS DC/DC měniče (strana spojů)

Deska plošného spoje a osazovací plán měniče vygenerován z prostředí Eagle, z technických důvodů byly provedeny drobné změny v podobě odpojení stabilizovaného zdroje kvůli zvýšenému rušení a budič je tedy napájen externím napájením.



2.7. Seznam součástek

Partlist

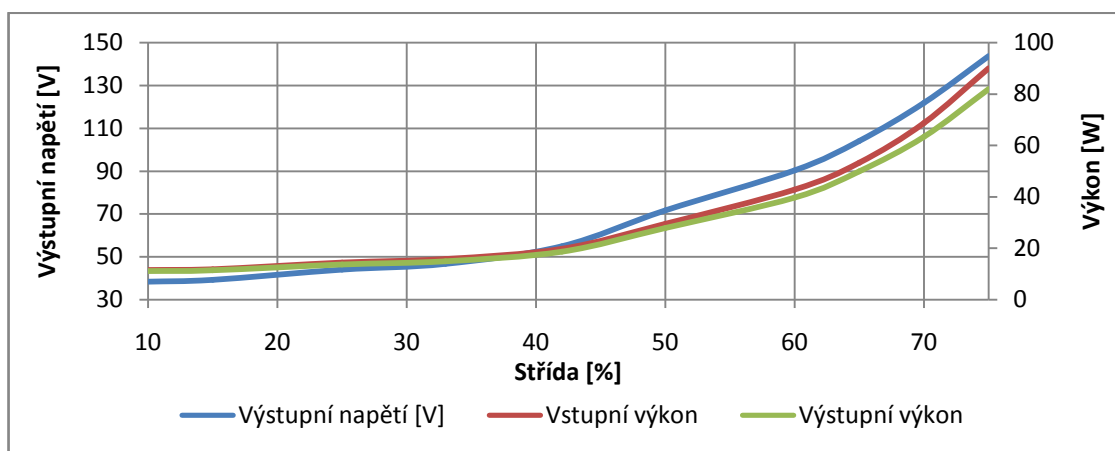
Exported from DC-DC Měnič.sch

Part	Value	Device	Package
C1	2.2mF	JNC2200/200	EB35D
C2	2.2mF	JNC2200/200	EB35D
C3	1mF	HC2E108M30045HA	EB30D
C4	10nF	C-RM7,5/2,5-10	C-RM7,5/2,5-10
C5	100nF	C-EU050-024X044	C050-024X044
C6	100nF	C-EU050-024X044	C050-024X044
C7	330nF	C-EU050-024X044	C050-024X044
C8	100nF	C-EU050-024X044	C050-024X044
D2	BZX85	BZX85	DO41-10
D3	BA159	BAT49	DO41-10
D5	1N4004	1N4004	DO41-10
D6	1N4004	1N4004	DO41-10
D7	BYV32	BYV32-200	TO220ABS
F1		FUSESH10	SH10A
F2		FUSESH6,3A	SH6,3A
F3		FUSESH6,3A	SH6,3A
IC1	4050N	4050N	DIL16
IC2		7815S	7815S
L1	200uH	DTMSS-47/0,22/15-V	TLUMIVKA
OK1	6N135	6N135	DIL08
PL1		20VS	20V
Q1	IRFP250N	IRFP240	TO247BV
R1	100R	R-EU_0207/10	0207/10
R2	10k	R-EU_0207/10	0207/10
R3	0,1R	W10_0,1R	R_10W
R4	5K (2K3)	R-TRIMM64Y	RTRIM64Y
R5	68K	R-EU_0207/10	0207/10
R6	5K (1K58)	R-TRIMM64Y	RTRIM64Y
R7	150K	R-EU_0207/10	0207/10
R8	S07K40	S07K40	S07K40
R9	1k	R-EU_0207/10	0207/10
R10	2k	R-EU_0207/10	0207/10
X3	22-23-2041	22-23-2041	22-23-2041
X4	22-23-2041	22-23-2041	22-23-2041
X5	22-23-2041	22-23-2041	22-23-2041
X6		AK500/2	AK500/2
X7		AK500/2	AK500/2

3. Měření na DC/DC měniči

Na měniči byl odměřeny nejdůležitější parametry, nejprve byl měnič buzen z generátoru a následně bylo provedeno měření, kdy již byl měnič buzen pomocí digitálního signálového procesoru.

3.1. Měření měniče buzeného z generátoru signálu.



Obr. 29 - Měnič buzený z generátoru signálu

Na obr. 29 je zobrazena závislost výstupního napětí a výkonu na střídě, kterou byl tranzistor spínán, jako zátěž měniče byly využity žárovky o celkovém výkonu 160W.

3.2. Měření zatěžovací charakteristiky

Zatěžovací charakteristika je změřena pro dvě vstupní napětí, a to $U_{INmin} = 28V$ a $U_{INmax} = 36V$, pro něž je měnič navrhován.

Tab. 2 - Tabulka hodnot pro $U_{IN} = 36V$

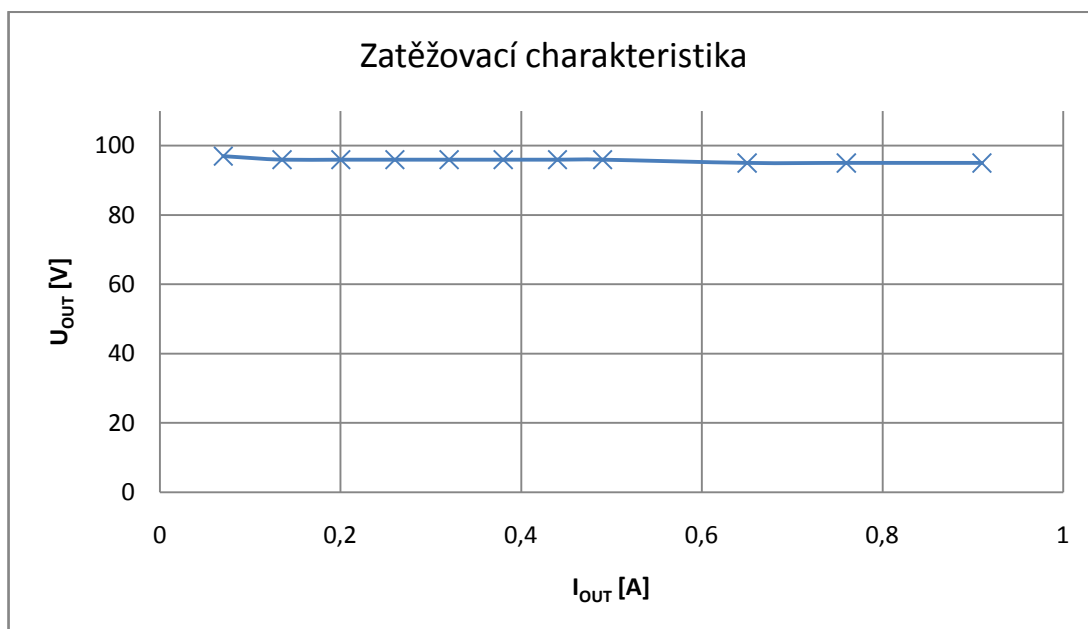
δ [%]	U_{IN} [V]	I_{IN} [A]	P_{in} [W]	U_{OUT} [V]	I_{OUT} [A]	P_{OUT} [W]	η [%]	R_Z [Ω]
60	36	0,2	7,2	97	0,07	6,8	94	1386
60	36	0,38	13,7	96	0,135	13,0	95	711
60	36	0,56	20,2	96	0,2	19,2	95	480
60	36	0,74	26,6	96	0,26	25,0	94	369
60	36	0,91	32,8	96	0,32	30,7	94	300
60	36	1,09	39,2	96	0,38	36,5	93	253
60	36	1,26	45,4	96	0,44	42,2	93	218
60	36	1,43	51,5	96	0,49	47,0	91	196
60	36	1,85	66,6	95	0,65	61,8	93	146
60	36	2,19	78,8	95	0,76	72,2	92	125
60	36	2,6	93,6	95	0,91	86,5	92	104

$$P_{IN} = U_{IN} \cdot I_{IN} = 36 \cdot 2,6 = 93,6W \quad (3.1)$$

$$P_{OUT} = U_{OUT} \cdot I_{OUT} = 95 \cdot 0,91 = 86,5W \quad (3.2)$$

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \cdot 100 = \frac{86,5}{93,6} \cdot 100 = 92\% \quad (3.3)$$

$$R_Z = \frac{U_{OUT}}{I_{OUT}} = \frac{95}{0,91} = 104\Omega \quad (3.4)$$



Obr. 30 - Zatěžovací charakteristika pro $U_{IN} = 36V$; $U_{OUT} = 96V$; $\delta = 60\%$

Tab. 3 - Tabulka hodnot pro $U_{IN} = 36V$

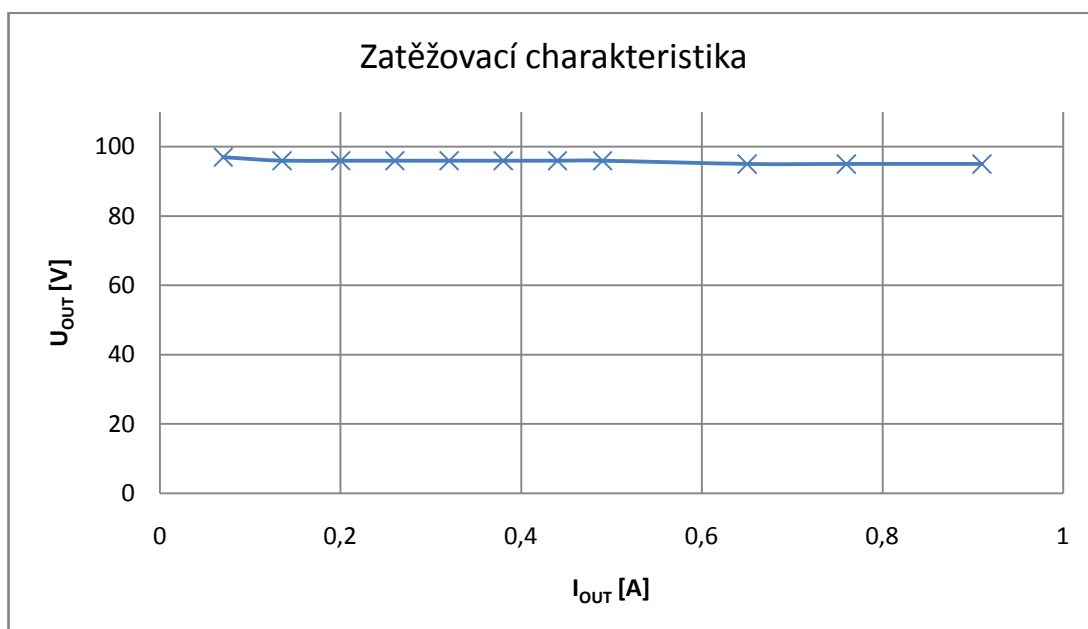
δ [%]	U_{IN} [V]	I_{IN} [A]	P_{in} [W]	U_{OUT} [V]	I_{OUT} [A]	P_{OUT} [W]	η [%]	R_Z [Ω]
70	28	0,28	7,8	0,074	96	7,1	91	1297
70	28	0,51	14,3	0,14	96	13,4	94	686
70	28	0,75	21,0	0,2	96	19,2	91	480
70	28	0,98	27,4	0,26	95	24,7	90	365
70	28	1,21	33,9	0,32	95	30,4	90	297
70	28	1,43	40,0	0,38	95	36,1	90	250
70	28	1,66	46,5	0,45	94	42,3	91	209
70	28	1,92	53,8	0,52	94	48,9	91	181
70	28	2,39	66,9	0,66	94	62,0	93	142
70	28	2,81	78,7	0,78	93	72,5	92	119
70	28	3,29	92,1	0,91	93	84,6	92	102

$$P_{IN} = U_{IN} \cdot I_{IN} = 28 \cdot 3,29 = 92,1W \quad (3.5)$$

$$P_{OUT} = U_{OUT} \cdot I_{OUT} = 93 \cdot 0,91 = 84,6W \quad (3.6)$$

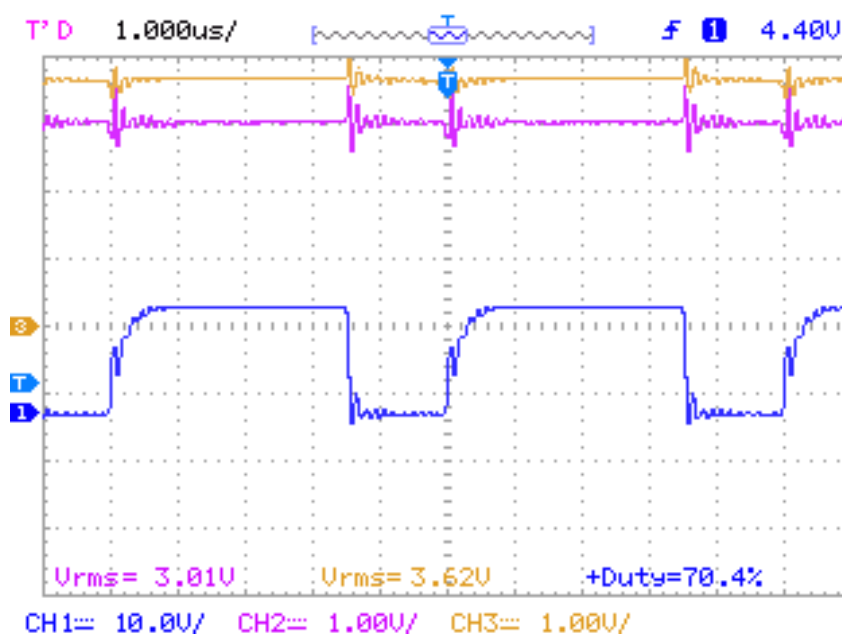
$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \cdot 100 = \frac{84,6}{92,1} \cdot 100 = 92\% \quad (3.7)$$

$$R_Z = \frac{U_{OUT}}{I_{OUT}} = \frac{93}{0,91} = 102\Omega \quad (3.8)$$



Obr. 31 - Zatěžovací charakteristika pro $U_{IN} = 28V$; $U_{OUT} = 96V$; $\delta = 70\%$

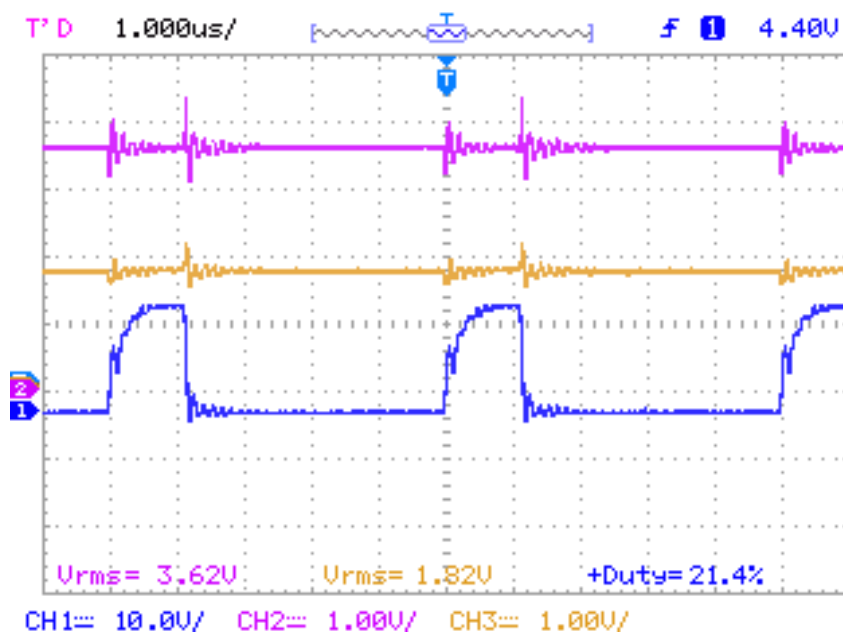
Ze zatěžovacích charakteristik vyobrazených na Obr. 30 a Obr. 31 můžeme usuzovat, že výstup měniče je poměrně stabilní. Zatěžování bylo prováděno pomocí žárovek o celkovém výkonu 300W, jejichž odpor se s teplotou mění. Vztahy (3.1) až (3.8) naznačují výpočet vstupního a výstupního výkonu, z nichž je počítána účinnost měniče, která se pohybuje okolo 90%. Vypočten je i přibližný odpor zátěže, kterou jsme měli k dispozici.



Obr. 32 - Snímek z osciloskopu ($\delta = 0,7$)

Na Obr. 32 je vyobrazen snímek z osciloskopu při měření zatěžovací charakteristiky měniče. Modře vidíme střidu spínání $\delta = 70,4\%$, což je doba, po kterou je tranzistor sepnut. Můžeme vidět, že i v případě použitého budiče tranzistoru nejsou hrany spínacích pulsů dokonalé strmé. Dále je vyobrazeno vstupní napětí (fialově), které bylo měřeno na výše zmiňovaném odporovém děliči, s poměrem 1:10. Vstupní napětí tedy odpovídá hodnotě $U_{IN} = 30V$. Posledním průběhem vyobrazeném na snímku je výstupní napětí (oranžová), měřené taktéž na odporovém děliči, ale s větším poměrem (1:30). Výstupní napětí v tom případě odpovídá hodnotě $U_{OUT} = 96V$.

Na následujícím obrázku (Obr. 33) je zobrazen průběh vstupního a výstupního napětí měniče, s velmi malou střídou. Proto, že je tranzistor sepnut po velmi krátkou dobu, v tlumivce se nenaakumuluje dostatečně velké množství energie a výstupní napětí dosáhne s těžší hodnoty $U_{OUT} = 60V$ (oranžový průběh). Velikost vstupního napětí je $U_{IN} = 36V$ (fialový průběh). Napětí, které se indukuje na tlumivce po dobu, kdy je sepnut tranzistor a teče jí proud je tedy ovlivněn časem, po který tento proud teče.

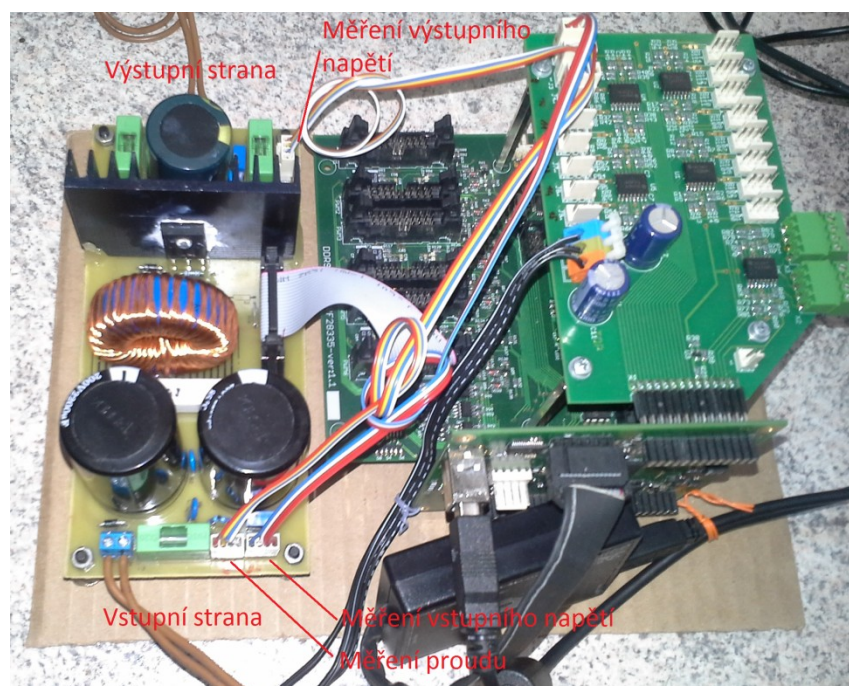


Obr. 33 - Snímek z osciloskopu ($\delta = 0,21$)

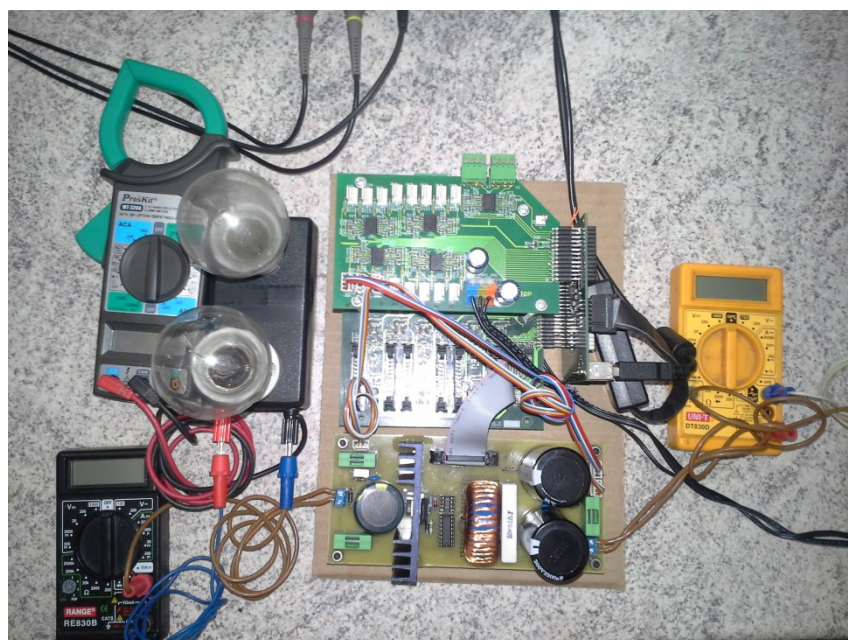
Seznam přístrojů

Osciloskop:	Aligent DSO1004A (50000016359/0)
	Hameg HM1507-3 (24668/0)
Generátor:	Metex MXG-9810A (50000005796)
Ruční multimetr:	RANGE RE830B
Klešťový multimetr:	Pro's Kit MT-3266
Laboratorní zdroj:	Diametral V140R50D (1102260112)
	Diametral L240R51D (50000024999)
	Tesla BS554 (16024/0)

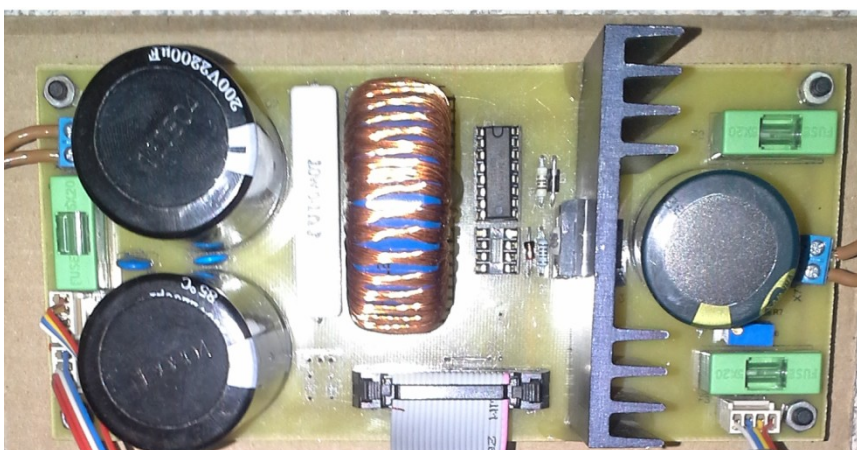
3.3. Fotodokumentace



Obr. 34 - DC/DC měnič s připojeným řídicím systémem



Obr. 35 - Zapojení měniče s použitými přístroji a zátěží



Obr. 36 - Snímek samostatného měniče

4. Závěr

Cílem práce bylo popsat základní měniče, jenž jsou vhodné pro připojení k fotovoltaickým panelům, což je provedeno v první části této práce. Byly popsány nejen měniče malých výkonů, které nejsou galvanicky odděleny, ale také měniče vyšších výkonů, které obsahují transformátor, zajišťující jejich galvanické oddělení.

Byl proveden kompletní návrh zvyšujícího měniče specifikovaných parametrů. Dále byly provedeny simulace navrženého měniče s použitím reálných součástek, z nichž byly získány zásadní informace sloužící k dalším návrhům měniče. Měnič je připraven pro spolupráci s řídicím systémem v podobě signálového procesoru TMS320F28335.

Posledním bodem bylo provést měření základních parametrů a veličin měniče napětí. Z výsledků měření vyplývá, že měnič pracuje s účinností okolo 92%.

Možnost rozšíření práce:

Tuto práci by bylo možné rozšířit o další typy měničů vyšších výkonů. K samotnému měniči by bylo vhodné přidat napájení pro řídicí systém a zdokonalit optické oddělení řídicího systému od budiče stínacího prvku.

Seznam literatury:

- [1] Krejčířík A., *DC/DC měniče*. Praha, BEN 2002. ISBN 80-7300-045-8
- [2] Faktor Z., *Transformátory a cívky*. Praha, BEN 1999. ISBN 80-86056-45-X
- [3] Křístek P., *Návrh a realizace výkonového DC/DC měniče* VŠB-TUO. 2011
- [4] Krejčí A., *Napájecí zdroje 1*. Praha, BEN 1997. ISBN 80-86056-02-3
- [5] *Ochrana proti přepětí*. [online] 2014 [1.5.20014]
<http://oklike.c-a-v.com/soubory/proti_prepeti.htm>
- [6] Chlebiš P., *Výkonová elektronika I*. OSTRAVA 2007. VŠB-TUO. ISBN 978-80-248-1485-8
- [7] Faktor Z., *Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje*. Praha, BEN 2002. ISBN 80-86056-81-0
- [8] *Výpočty chlazení elektrotechnických součástí*. [online] 2014 [1.5.20014]
<www.souch.cz/dok/e/chlazení.pdf>
- [9] *305 zajímavých zapojení 2.díl*. Sbírka příkladů, překlad německého originálu. Ostrava, HEL 2003. ISBN 80-902059-5-X
- [10] Bc. Martin Střelec, *Řídící jednotka měniče pro fotovoltaické panely*. VŠB-TUO 2014

Seznam použitých zkratek a symbolů:

Symbol	Jednotka	Popis
di_{Lzap}		Diferenciála proudu tlumivkou v době t_1
di_{Lvyp}		Diferenciála proudu tlumivkou v době t_2
C	[F]	Kapacita
C		Kondenzátor
D		Dioda
f_{sw}	[Hz]	Spínací kmitočet
F		Pojistka
I	[A]	Proud
I_C	[A]	Proud kondenzátorem
I_D	[A]	Proud diodou
$I_{F(AV)}$	[A]	Střední hodnota propustného proudu
I_{FRMS}^2	[A ²]	Efektivní hodnota propustného proudu
I_{IN}	[A]	Vstupní proud
I_{INmax}	[A]	Maximální vstupní proud
$I_{L1,2}$	[A]	Proud protékající cívkou
I_{Lmax}	[A]	Maximální proud protékající cívkou
I_{Lmin}	[A]	Minimální proud protékající cívkou
I_m	[A]	Maximální hodnota proudu
I_{OUT}	[A]	Výstupní proud
L	[H]	Indukčnost
$L_{1,2,3,4}$		Cívka
P_{IN}	[W]	Vstupní výkon
P_{OUT}	[W]	Výstupní výkon
P_{TOT}	[W]	Ztrátový výkon
Q_1		Spínací prvek - tranzistor
R	[Ω]	Odpor
R		Rezistor
$r_{DS(ON)}$	[Ω]	Vnitřní odpor tranzistoru v sepnutém stavu

R_{thj-c}	$[KW^{-1}]$	Teplotní odpor součástky mezi PM přechodem a pouzdem
R_{thc-h}	$[KW^{-1}]$	Teplotní odpor součástky mezi pouzdem a chladičem
R_{thh-a}	$[KW^{-1}]$	Teplotní odpor součástky mezi chladičem a okolím
R_Z	$[\Omega]$	Zatěžovací rezistor
T	$[s]$	Perioda
$T1$		Transformátor
t_1	$[s]$	Doba zapnutí spínacího prvku
t_2	$[s]$	Doba vypnutí spínacího prvku
T_a	$[^{\circ}C]$	Teplota okolí
T_c	$[^{\circ}C]$	Teplota pouzdra součástky
T_{jmax}	$[^{\circ}C]$	Maximální teplota PN přechodu součástky
t_{rr}	$[s]$	Obnovovací doba diody
U	$[V]$	Napětí
U_{x41-2}	$[V]$	Napětí na svorkách označených na schématu
U_{x51-2}	$[V]$	Napětí na svorkách označených na schématu
U_{FD1}	$[V]$	Propustné napětí na diodě
U_{GS}	$[V]$	Budící napětí tranzistoru
U_{IN}	$[V]$	Vstupní napětí
U_{INmax}	$[V]$	Maximální vstupní napětí
U_{INmin}	$[V]$	Minimální vstupní napětí
$U_{L1,2}$	$[V]$	Napětí na cívce
U_{OUT}	$[V]$	Výstupní napětí
U_{RD1}	$[V]$	Závěrné napětí na diodě
V_{DS}	$[V]$	Napětí na tranzistoru
V_{RRM}	$[V]$	Maximální opakovatelné špičkové napětí
vyp		Stav vypnuto
zap		Stav zapnuto
δ		Střída
δ_{max}		Maximální střída
δ_{min}		Minimální střída
η	$[\%]$	Účinnost

